

(10) 合成構造を採用した幅広フーチングケーソンの構造特性と設計法

Structural behavior and design method of a hybrid long-footing caisson

松本 英雄*, 池田 高則**, 北澤 壮介***, 荒見 敦史****, 中村 滋*****
Hideo Matsumoto, Takanori Ikeda, Sousuke Kitazawa, Atsushi Arami, Sigeru Nakamura

- * 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 (〒231-0003 横浜市北仲通 5-57)
** 運輸省第四港湾建設局 下関調査設計事務所 (〒750-8504 下関市竹崎町四丁目 6-1)
*** (財) 沿岸開発技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16)
**** 石川島播磨重工業 (株) 鉄構事業部 (〒135-8732 東京都江東区豊洲 3-1-15)
***** 日本鋼管 (株) 鉄構建設部 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2-1)

A composite breakwater with RC-caissons is likely to be rather uneconomical because of a large safety margin for sliding or a large mound in relatively calm sites. To meet the reduction of construction cost, extension of footings is effective. However, the maximum length of RC-caisson's footing is around 3m for structural reasons. Therefore, a hybrid long-footing caisson has been developed, which consists of footings attached with SRC-beams, hybrid buttresses and hybrid main hull to realize an economical breakwater.

In this paper, the design method of the hybrid long footing caisson is proposed through finite element calculations and model loading experiments.

Key Words: 防波堤, 合成構造, バットレス, 設計法, ロングフーチング

1. 開発の背景

近年, 船舶の大型化によって, 大水深岸壁の必要性が増し, それに伴い大深度海域における防波堤整備が必要となる。

防波堤の形式の一つであるケーソン式混成堤の断面(図-1)は, ケーソンの滑動および転倒に対する安定性と捨石基礎部分の支持力に対する安定性を確保するように決定される。大水深で比較的静穏な海域において, ケーソン式混成堤の断面は滑動に対する安全率には余裕があり, 基礎の支持力で断面が決定されることが多い。ケーソン幅を狭くしてフーチング幅を延長すれば, 転倒および基礎の支持力に対する安全性を確保した経済的な断面となる。

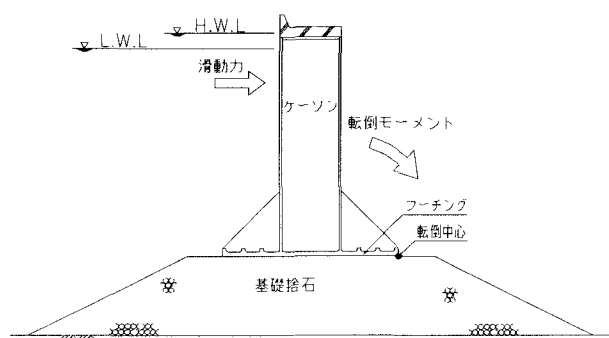


図-1 混成堤断面図

鉄筋コンクリート(RC)製ケーソンでのフーチング長は, 実績などからバットレスをつけても最大3m程度が限界である。

また, 鋼とコンクリートの合成構造を採用し, 高い曲げ耐力を有するハイブリッドケーソンの実績でも, フーチング長さは最大6mである。幅広フーチングケーソンはフーチングにバットレスを設けハイブリッドケーソンよりもフーチングを大きく張り出すことを目指して開発されたケーソンである。

本論文では, 幅広フーチングケーソンの特徴であるフーチング部およびバットレス部の構造特性を紹介するとともに, 構造解析結果をふまえた実務的な設計手法を提案するものである。

2. 構造特性

幅広フーチングケーソンの概略構造を図-2に示す。本ケーソンは, フーチング部に高い耐力を期待できる鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)構造のバットレスを設けてフーチングを大きく張り出すとともに, RC構造のフーチング版を剛性の高い鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)構造の小梁で支持していることが大きな特徴である。

防波堤ケーソンのフーチング部に作用する荷重は主に底面反力およびフーチング自重等による分布荷重である。フーチングに設けた小梁の剛性が十分大きければ, フー

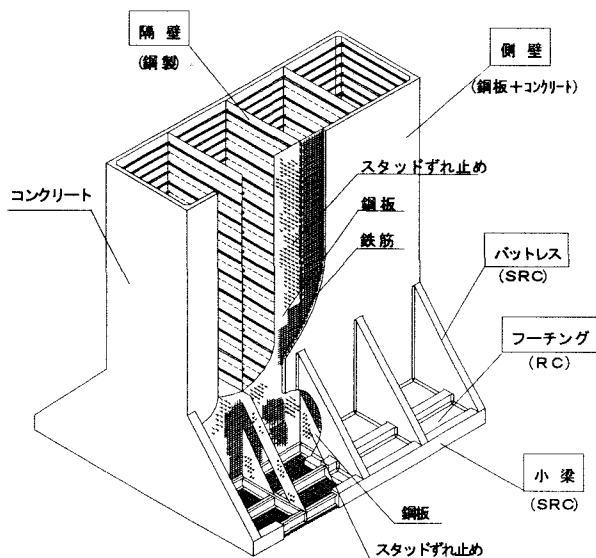


図-2 幅広フーチングケーソン概略構造

フーチング版に作用する荷重は小梁を介してパットレスに伝達される。この時小梁は、支承部とみなせるので版の設計に用いるスパンを小梁間隔にすることが期待でき、フーチング版厚を薄く抑えることができる。

3. 部材設計法の検討

3.1 フーチング部の検討

井福ら²⁾は、幅広フーチングケーソンのフーチング部の設計を簡便に行えるように、フーチング部を三辺固定一辺支持版（側壁側底版）、および二辺固定二辺支持版（先端側底版）と仮定し、曲げモーメント算定に用いる計算数表を作成している。さらに、小梁を配置したフーチング（梁付フーチング）全体についても有限要素法（FEM）解析を行い（図-3）、計算数表の適用性を検討している。その結果、小梁のたわみにより発生した付加曲げモーメントの影響により両者の計算結果に差異があることを指摘している。

ここではこの小梁のたわみにより発生した付加曲げモーメントの影響を考慮するために、補正係数で対応する方法を考案する。

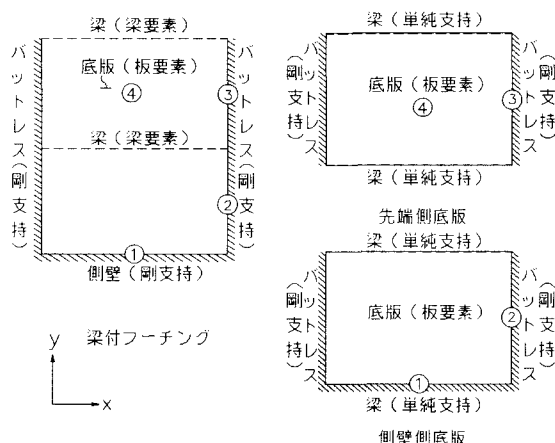


図-3 解析モデル

(1) 付加曲げモーメントの影響の検討

梁付フーチングの曲げモーメントの分布は、梁とフーチングの曲げ剛性の比およびフーチングの縦横の長さの比に影響される。弾性梁上の版の曲げモーメントを求める数表のパラメータとして以下の式がある³⁾。

$$\lambda_b = \frac{EI}{\alpha \cdot D} \quad (1)$$

ここに、 EI : 梁の曲げ剛性

α : 梁で支持される版の辺長

D : フーチングの曲げ剛性で以下による

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

t : フーチングの版厚

ν : ポアソン比

E : ヤング率

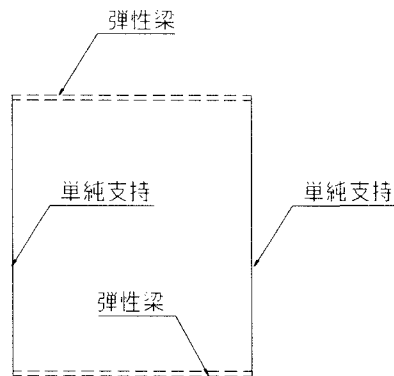


図-4 二辺弾性支持二辺単純支持版

このときの版の支持条件は二辺弾性支持二辺単純支持であり、相対する二辺（パットレス間）を固定としている幅広フーチングの支持条件とは異なる。そこで、計算数表から求まる値と梁付フーチングのFEM解析の結果から、それぞれの曲げモーメントの比

$$\text{補正係数 } \beta = \frac{\text{FEM解析から求まる曲げモーメント}}{\text{計算数表から求まる曲げモーメント}}$$

を整理し、 λ_b が曲げモーメントの補正係数算定のパラメータとして妥当かどうか判断する。

(2) 解析条件

解析は、井福らのFEM解析モデルで用いられている梁の剛性値と等しくした場合、1/2倍、3/4倍、1.5倍および2倍としたFEM解析モデルで行った。その際、フーチングの縦横比は0.5~0.7とした。

フーチング縦横比：

λ = 小梁の間隔 / パットレス間隔

設計荷重

等分布荷重 319kN/m²

表-1 材料特性

	ヤング率 N/mm ²	ポアソン比
コンクリート	2.8×10^4	0.20
鋼材	2.0×10^5	0.30

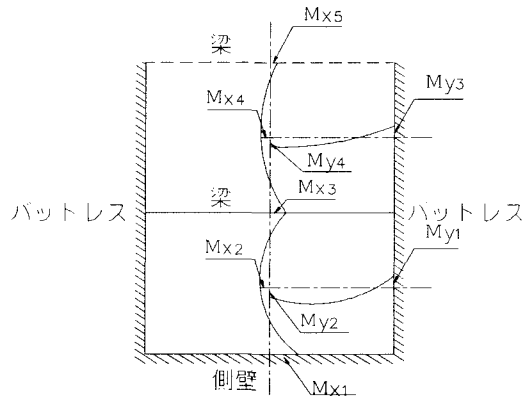


図-5 梁付フーチングの曲げモーメント分布

(3)検討結果

曲げモーメントの補正係数を図-6～11に示す。同図では解析結果を対数補間している。補正係数は λ_b に対して、ほぼ線形状を表しており、曲げ剛性の比 λ_b はパラメータとして妥当と思われる。また、Mx1, My1, My2, My3, My4では曲げ剛性の比が大ならば補正係数は小となり、版の縦横長さの比 λ の順に補正係数は小となっている。さらに、Mx4では一定であるとみなせるので、補正係数としては0.8の一定値と近似することができる。同様に、Mx2では0.7の一定値とみなすことができた。

上記により、小梁のたわみによる版の付加曲げモーメントの影響を λ_b および λ をパラメータとした補正係数 β で対応することが可能と判断される。

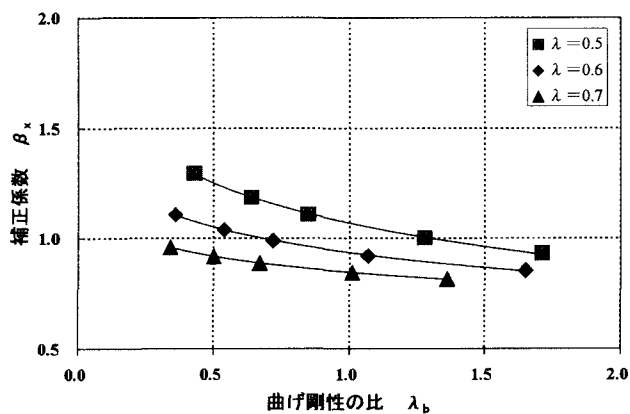


図-6 補正係数（位置：M_{x1}）

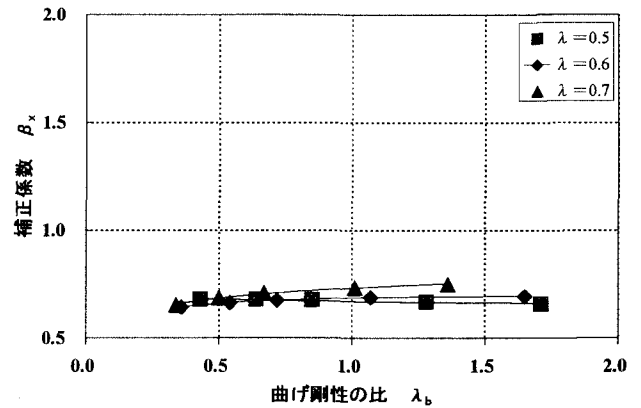


図-7 補正係数（位置：M_{x4}）

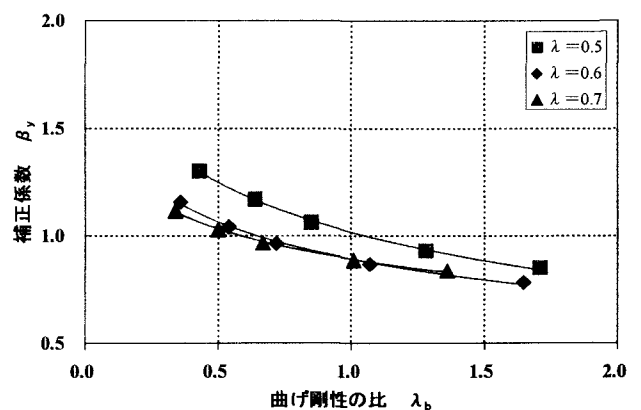


図-8 補正係数（位置：M_{y1}）

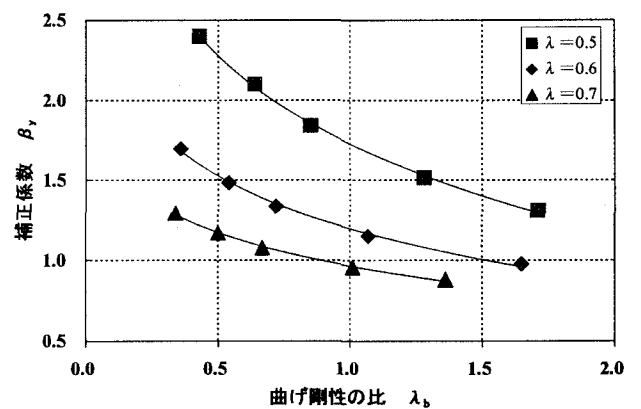


図-9 補正係数（位置：M_{y2}）

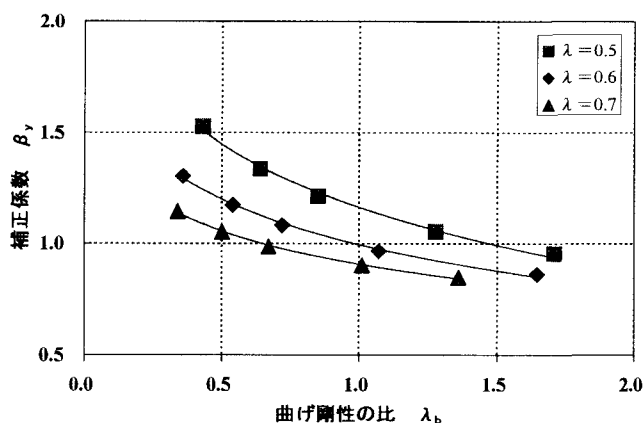


図-10 補正係数 (位置: M_{y3})

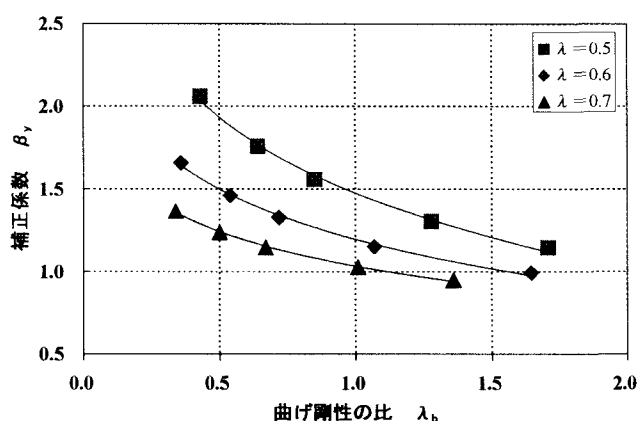


図-11 補正係数 (位置: M_{y4})

3.2 バットレス部の検討

井福らは、せん断力に対して川崎ら⁴⁾の提案するディープビームのせん断耐力式に鉄骨部分の項を加えて検討を行っている。さらに、FEM解析によってバットレスの面内応力を求め、コンクリート標準示方書に従い面内力を受ける面部材として検討を行っている。この方法によると、FEM解析によって面内応力を求める必要がある。設計の汎用性を考えた場合、FEM解析を行うことなく面内応力を算定する必要があり、以下において設計法の検討を行う。

(1) 解析モデル

FEM解析のモデルを図-12に示す。

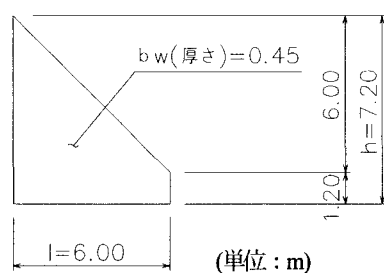


図-12 解析モデル

バットレスへの荷重載荷方法は図-13に示す2ケースとした。ケース1では小梁の存在を無視し、版の荷重分担の仮定に基づき、図-13(a)に示す範囲の荷重がバットレスに伝達されることを想定している。その時の載荷状態は図-13(c)のとおりである。

一方ケース2では小梁の剛性が十分にあり、図-13(b)に示す範囲の荷重がバットレスに伝達されることを想定している(図-13(d))。

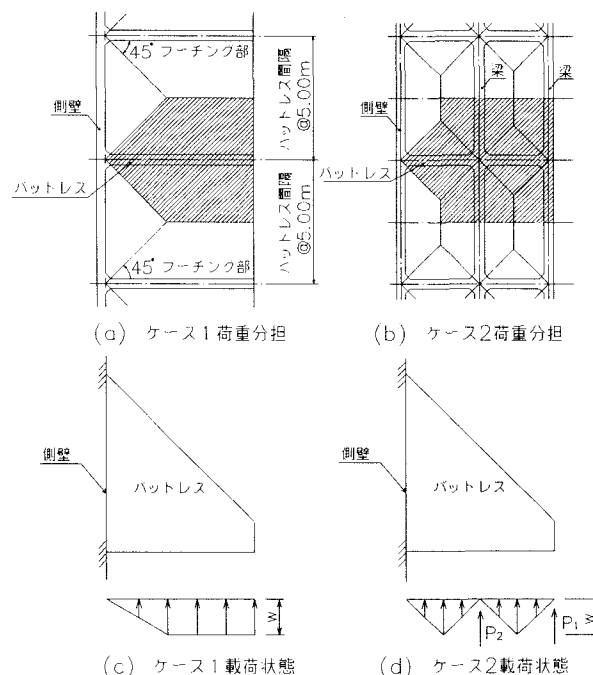


図-13 バットレスの設計荷重

(2) 検討結果

上記ケース1におけるFEM解析結果を図-14に示す。図-14(b)にバットレス付根部断面、図-14(c)にバットレス付根部からバットレス幅の1/4の断面における垂直応力度(σ_x)を示す。いずれも平面保持の仮定が成立していない。

図-14(d)にバットレス支承部からバットレス幅の1/2の断面における垂直応力度(σ_x)を示す。この断面では平面保持の仮定がほぼ成立している。

バットレス付根部に関する弾性理論による垂直応力度(σ_x)を図-15に示し、FEM解析から得られた垂直応力度(σ_x)と比較した結果を表-2に示す。バットレス付根部を除く範囲において両者は概ね一致している。バットレス付根部は圧縮側に関しては弾性理論による応力度の方が大きい値となり、引張側に関してはFEM解析から得られた応力度の方が大きい値となっている。

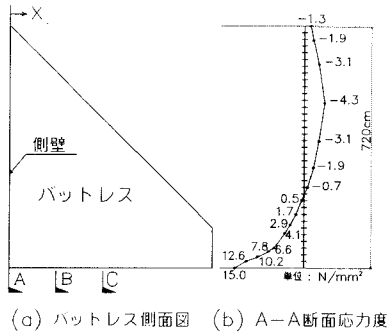
表-2 曲げ応力度の比較

単位: N/mm²

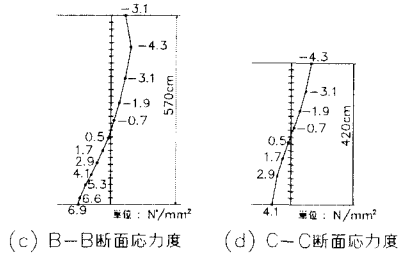
	付 根 部		中 央 部	
	引張側	圧縮側	引張側	圧縮側
FEM	15.0	-4.3	4.1	-4.3
弾性理論	11.0	-6.4	5.5	-4.3

表-3 水平引張力

	水平引張力 (kN)	備 考
FEM	4067	
トラスモデルの 水平引張力T $T=M/d$	3872	曲げモーメント $M=27102\text{kN}\cdot\text{m}$ 有効高 $d=7.0\text{m}$

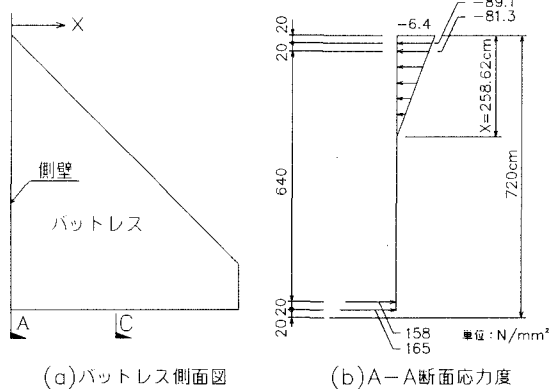


(a) バットレス側面図 (b) A-A断面応力度

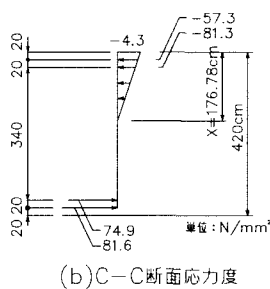


(c) B-B断面応力度 (d) C-C断面応力度

図-14 FEMによる応力度



(a) バットレス側面図 (b) A-A断面応力度



(c) C-C断面応力度

図-15 弾性理論による応力度

前述の解析ケース 2 についても同様の傾向が認められた。したがって小梁の支点反力によってバットレスの性状が大幅に変化することはないと判断された。

バットレスをコンクリート標準示方書のコーベルとみなして、トラスモデルの水平張力と FEM 解析結果とを比較する。表-3 に示すように、両者の値はよく一致している。したがって、バットレス付根部はコーベルの挙動に近いものと判断される。

(3) 実務的な設計手法

以上の考察から設計実務上は FEM 解析に代えて下記設計手法を提案する。

バットレス付根部をコンクリート標準示方書のコーベルの項を準用して曲げモーメントおよびせん断力に対して設計し、併せてバットレス幅全域について棒部材として曲げモーメントおよびせん断力に対して設計する。この時コーベルとしてのせん断耐力 V_{yd} は鋼板により受け持たれるせん断耐力を加えた式(2)で算出する。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{ssd} \quad (2)$$

ここに、 V_{cd} : せん断補強筋を用いない設計せん断耐力で式(3)による。

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_s \cdot \beta_r \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (3)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad (d:\text{m})$$

ただし、 $\beta_d > 1.5$ となる場合は 1.5 とする。

$$\beta_p = \sqrt[3]{100P_w}$$

ただし、 $\beta_p > 1.5$ となる場合は 1.5 とする。

$$\beta_s = \frac{5}{1 + (a_v/d)^2}$$

β_r : 荷重の種類の影響を考慮するための補正係数

$$f_{dd} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}} \quad (\text{N/mm}^2)$$

d : 有効高さ (m)

P_w : 引張鉄筋比 ($= A_s / (b_w \cdot d)$)

A_s : 引張鉄筋断面積

b_w : せん断有効幅

a_v : 仮想荷重位置 ($= M/S$)

M : バットレス付根部曲げモーメント,

S : せん断力

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²)

γ_b : 部材係数

V_{ssd} : 鋼板により受け持たれる設計せん断耐力

で、式(4)による。

$$V_{ssd} = t_w \cdot h_s \cdot f_{vy} / \gamma_b \quad (4)$$

t_w : 鋼板の板厚

h_s : 鋼板の有効高さ

f_{vy} : 鋼板のせん断降伏強度 $(= f_y / \sqrt{3})$ (N/mm²)

f_y : 鋼板の引張降伏強度 (N/mm²)

γ_b : 部材係数

なお、式(3)では、荷重の種類を考慮するための補正係数 β_r を導入している。これは以下の考え方による。

コーベルのせん断耐力式は集中荷重が作用した場合を想定しているが、幅広フーチングケーソンのバットレスには分布荷重が作用する。一般に梁のせん断耐力は荷重の種類、載荷位置等の影響を受け、分布荷重が作用する梁のせん断耐力は集中荷重が作用する場合に比べて大きい耐力が期待できる。川崎らによって「コンクリート標準示方書」のディープビームせん断耐力式により求めたせん断耐力と載荷実験から得られた実験値の比から、コンクリート標準示方書に示されている耐力式に補正係数 β_r を 1.3 として乗じる提案がなされている。したがって、FEM等の方法により確認できれば補正係数 β_r を 1.0 より大きくすることにより、せん断補強筋を用いない設計せん断耐力 V_{cd} を割り増すことが可能である。

4. 結論

これまでの検討により得られた各部材の設計に関する知見を以下に示す。

幅広フーチングケーソンはハイブリッドケーソンを構造の基本としている。フーチング部にSRC構造のバットレスを設けて、フーチングを大きく張り出し、RC構造のフーチング版をSRC構造の梁で支持することで版厚を薄く抑えている。幅広フーチングケーソンの特徴であるフーチング部およびバットレス部に着目した構造解析の結果、フーチング部はSRC構造の小梁によって区切られた2枚の版としてみなすことができる。小梁位置の境界条件は単純支持とし、三辺固定一辺支持版、二辺固定二辺支持版とする。一般的にケーソンの設計に用いる計算数表と、小梁のたわみによる付加曲げモーメントの影響を表した補正係数を用いることにより版の設計を行えることがわかった。

バットレス部はコンクリート標準示方書に従い付根部をコーベルとして設計し、付根部を含む全域を棒部材として設計すれば良いことがわかった。

最後に本ケーソンの検討にあたり、ご指導をいただいた早稲田大学理工学部の清宮教授、運輸省港湾技術研究所の横田構造強度研究室長をはじめ、幅広フーチングケーソン技術開発検討会（沿岸開発技術研究センター）各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (財) 沿岸開発技術研究センター：ハイブリッドケーソン設計マニュアル，1999
- 2) 井福，大釜，石川：合成構造による幅広フーチングケーソンの技術開発，テクノオーシャン'98 論文集，pp.141-144，1998
- 3) S.Timoshenko，S.Woinowsky-Krieger：THEORY OF PLATES AND SHELLS
- 4) 川崎，山田，清宮：港湾用ケーソンのバットレス部に関する載荷実験，コンクリート工学論文集，1997
- 5) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，pp.165-167，1996